

KLIMAMODELLSIMULATIONEN

Heiko Paeth, Würzburg

1. Einleitung

Neben den beobachteten Indikatoren des Klimawandels kommt seit ca. 30 Jahren den Klimamodellen eine zentrale Bedeutung in der Klimaänderungsforschung zu. Viele Fragen hinsichtlich der mutmaßlichen anthropogenen Klimaänderungen können sogar nur auf der Grundlage von Klimamodellen beantwortet werden. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass Klimamodelle nur ein stark vereinfachtes Abbild der Realität darstellen können und somit diversen Unsicherheiten unterliegen. Im folgenden Beitrag wird die Notwendigkeit der Klimamodellierung erläutert, die Funktionsweise eines Klimamodells beleuchtet, und es werden neueste Ergebnisse der internationalen Klimamodellierungsaktivitäten im Kontext des vierten Sachstandsberichtes des IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) vorgestellt. Anschließend

wird auf die Nachweisproblematik des anthropogenen Klimawandels eingegangen.

2. Warum Klimamodelle?

Eine wichtige wissenschaftliche Ausgangsbasis für die Klimadiskussion ist die wegen ihrer Form als *Hockey-Schläger* bezeichnete Temperaturkurve von Mann *et al.* (1998). Diese Kurve beschreibt die zeitliche Entwicklung der nordhemisphärisch gemittelten bodennahen Temperatur über die letzten ca. 1000 Jahre (vgl. Abbildung 1, Mitte). Als Informationsquellen dienen überwiegend indirekte Klimazeugen wie Baumringe, Sedimente, Eisbohrkerne und schriftliche Aufzeichnungen sowie seit ca. 1850 direkte klimatologische Messwerte. Die Temperaturwerte sind als Anomalien gegenüber der Klimanormalperiode 1961 bis 1990 zu verstehen. Es zeigt sich, dass die Temperatur über die vergangenen Jahrhunderte überwiegend kälter war als im 20. Jahrhundert. Es zeichnen sich auch einige Minima ab, beispielsweise um das Jahr 1350, gegen Ende des 15. und 17. Jahrhunderts

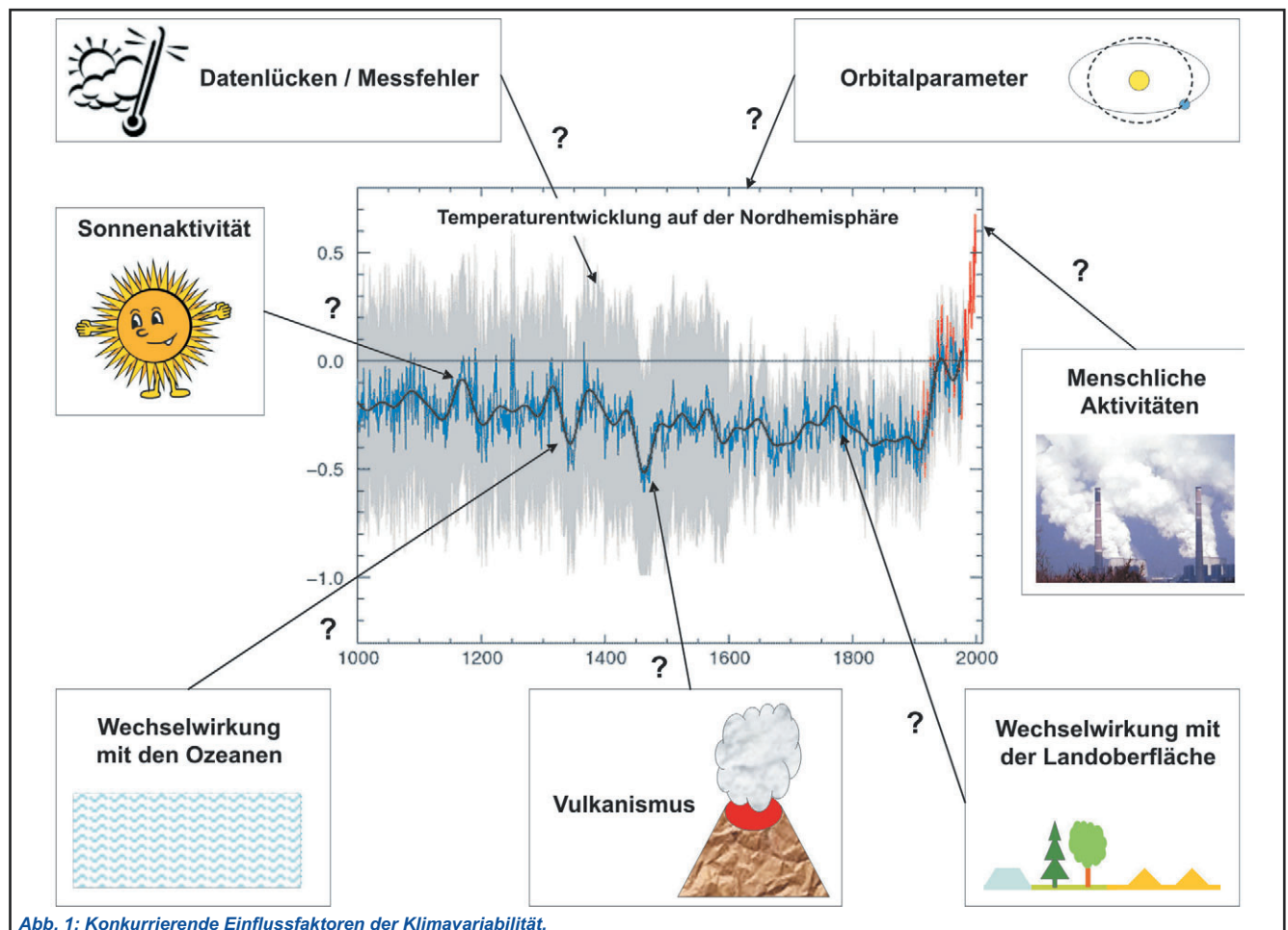


Abb. 1: Konkurrierende Einflussfaktoren der Klimavariabilität.

sowie im gesamten 19. Jahrhundert. Gemeinhin hat der Zeitabschnitt zwischen dem 14. und 19. Jahrhundert unter der Bezeichnung *Kleine Eiszeit* Eingang in die Literatur gefunden. Danach ergibt sich ein beispielloser Temperaturanstieg, der sich in zwei Phasen vollzieht: zu Beginn des 20. Jahrhundert gefolgt von einer leichten Abkühlungsphase zwischen 1940 und 1970 und verstärkt seit dem Jahr 1970 bis heute. Die Erwärmungsrate beläuft sich global auf etwa $0,7^{\circ}\text{C}$ seit dem Ende des 19. Jahrhunderts, also seit dem Beginn der Industrialisierung in Europa und Nordamerika.

Bereits vor über 100 Jahren wurde von dem schwedischen Chemiker Svante Arrhenius die Hypothese aufgestellt, dass der Ausstoß von Treibhausgasen wie Kohlendioxid, Methan und Stickoxiden zu einer nachhaltigen Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre und zu einem Anstieg der bodennahen Lufttemperatur führen könnte. Seitdem mehren sich die Anzeichen für einen solchen menschlichen Eingriff in das globale Klima: Der rezente Temperaturanstieg ist beispiellos seit wenigstens 1000 Jahren, und die atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen sind gegenüber dem vorindustriellen Niveau um ca. 36 % angestiegen, d.h. von 280 ppm auf über 380 ppm (*parts per million*). Es ist im Übrigen nicht das Ausmaß der Erwärmung selbst, welches außergewöhnlich ist. In der Vergangenheit haben sich im Wechsel zwischen Eiszeiten und Warmzeiten Temperaturschwankungen in der Größenordnung von über 10°C im nordhemisphärischen Mittel ergeben. Vielmehr scheint die Schnelligkeit der rezenten Erwärmung in nur 120 Jahren auf einen neuen Einflussfaktor im irdischen Klimasystem hinzuweisen: den Menschen (*Houghton et al., 2001*).

Nun stellt sich angesichts der *Hockey-Schläger-Kurve* das Problem, dass die rezente Erwärmung zwar plausibel auf die steigenden Treibhausgaskonzentrationen zurückzuführen ist, aber ein Beweis für diesen kausalen Zusammenhang existiert nicht. Denn zum einen gab es auch ohne menschliche Aktivitäten bereits markante Klimaänderungen im Wechsel der pleistozänen Eiszeiten oder im Übergang vom Mesozoikum zum Tertiär. Zum anderen ist die Temperaturentwicklung in der Mitte des 20. Jahrhunderts durch eine leichte Abkühlung gekennzeichnet, obwohl zeitgleich die Treibhausgaskonzentrationen weiter angestiegen sind. Offenbar konkurriert der Mensch mit weiteren Einflussfaktoren und Prozessen, die Klimaschwankungen hervorrufen können (*Schönwiese, 1995*). Die Abbildung 1 verbildlicht diese Konkurrenzsituation: Die wichtigsten Faktoren der natürlichen Klimavariabilität sind die Schwankungen der solaren Einstrahlung, die durch physikalische Prozesse in der Sonne selbst hervorgerufen werden, die Vulkanausbrüche, die durch den

Eintrag von Asche und Gasen die Atmosphäre trüben, und die zyklischen Variationen der Erdbitalparameter, die die Lagebeziehung zwischen Sonne und Erdumlaufbahn bzw. Erdrotation steuern. Hinzu kommen die internen Wechselwirkungen zwischen den Systemkomponenten Atmosphäre, Hydrosphäre (v.a. die Ozeane) und Biosphäre (v.a. die Vegetation und Eisbedeckung). Diese Faktoren und Prozesse haben die zeitliche Entwicklung der Temperatur seit der Entstehung der Erde geprägt. So lassen sich auch viele der Temperaturschwankungen in der *Hockey-Schläger-Kurve* auf Minima und Maxima der solaren und/oder vulkanischen Aktivität zurückführen.

Gilt dies aber auch für das 20. Jahrhundert oder dominiert der Mensch seit Beginn der Industrialisierung das Klimageschehen? Diese für die Klimapolitik essentielle Frage lässt sich auf der Basis einer einzelnen Zeitreihe natürlich nicht beantworten, da jede Veränderung in der Zeitreihe theoretisch auch durch einen natürlichen Klimafaktor verursacht worden sein kann. Stattdessen muss ein Experiment konzipiert werden, bei dem die Temperaturentwicklung ohne den Einfluss des Menschen, aber unter Berücksichtigung der natürlichen Faktoren untersucht werden kann. Im konkreten Fall würde dies bedeuten, den Planeten Erde nachzubauen und ohne den Einfluss des Menschen, aber unter ansonsten identischen natürlichen Bedingungen ca. 4,6 Milliarden Jahre zu beobachten. Aus der direkten Differenz der realen Erde mit der im Labor konzipierten Erde ließe sich der anthropogene Klimafaktor isolieren und die Frage nach der Notwendigkeit von Klimaschutzmaßnahmen beantworten. Es ist offensichtlich, dass eine solche Vorgehensweise weder technisch noch finanziell realisiert werden kann.

Hier kommt nun die Klimamodellierung ins Spiel. Mit einem Klimamodell lässt sich am Computer ein virtuelles irdisches Klima simulieren, das auf den bekannten Gesetzmäßigkeiten und Rahmenbedingungen unseres Planeten basiert und die realen Prozesse und Zustände wie Wind, Temperatur und Niederschlag zahlenmäßig ausdrückt. Klimamodelle besitzen drei ganz entscheidende Vorteile: Zum einen lassen sich bestimmte Einflussfaktoren isoliert betrachten oder unterdrücken, um die Kausalzusammenhänge zwischen Einfluss und Auswirkung im Klimasystem quantitativ zu erfassen. Dies bedeutet, dass Klimamodelle maßgeblich zum klimatologischen Prozessverständnis beitragen. So zeigen die Klimamodellstudien von *Stott et al. (2000)* beispielsweise, dass die Temperaturentwicklung im 20. Jahrhundert, vor allem aber vor 1970, nur durch die Überlagerung von natürlichen Klimafaktoren und menschlichen Aktivitäten reproduziert werden kann. Zum anderen lässt sich das Klima am Computer schneller als in Echtzeit simulieren, so dass auch

Zeiträume von mehreren Jahrhunderten Klimaschehen in wenigen Monaten berechnet werden und als Grundlage für dringende politische oder planerische Entscheidungen dienen können. Zuletzt lässt sich mit Hilfe der Klimamodelle auch ein Blick in die klimatische Zukunft unseres Planeten werfen. Dadurch soll beurteilt werden, inwiefern eine Fortsetzung der aktuellen menschlichen Aktivitäten zu einer besorgniserregenden Veränderung des Erdklimas führt, die in der Zukunft unsere Lebensbedingungen in gesundheitlicher, ernährungstechnischer, politischer oder ökonomischer Hinsicht gefährden könnte. Des Weiteren kann auch untersucht werden, ob internationale Klimaschutzbestrebungen diese Gefahr abwenden können. Hinzu kommt, dass Klimamodelle lückenlose Datensätze produzieren, die auch keinen Messfehlern unterliegen. Dennoch ist es selbstredend, dass die Klimamodelle nur ein ungefähres Bild unseres Klimasystems zeichnen können. Die daraus resultierenden Unsicherheiten sind ein wichtiger Aspekt in der aktuellen Diskussion um den anthropogenen Klimawandel und führen auf den Begriff der Nachweisproblematik. Um die Quellen der Modellunsicherheit zu verdeutlichen, soll im Folgenden

die Funktionsweise eines Klimamodells beleuchtet werden.

3. Wie funktionieren Klimamodelle?

Viele Vorgänge im Klimasystem basieren auf bekannten physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Hierzu gehören die Strömungsvorgänge in Atmosphäre und Ozean, also Wind bzw. Meeresströme, und die daran gekoppelten Massenverlagerungen ebenso wie die Veränderung der Temperatur, die durch die Hauptsätze der Thermodynamik beschrieben wird, sowie die Phasenumwandlung des Wassers. Die zeitlichen Änderungen dieser Größen an einem Ort werden durch physikalische Differenzialgleichungen der Form

$$\frac{\partial E}{\partial t} = f(t, \vec{v})$$

beschrieben: Die Änderung einer atmosphärischen oder ozeanischen Eigenschaft E pro infinitesimal kleiner Zeitänderung t ist eine Funktion der Zeit und der durch das Windfeld bzw. die Meeresströme angeregten räumlichen Austauschvorgänge. Verschiedene Orte

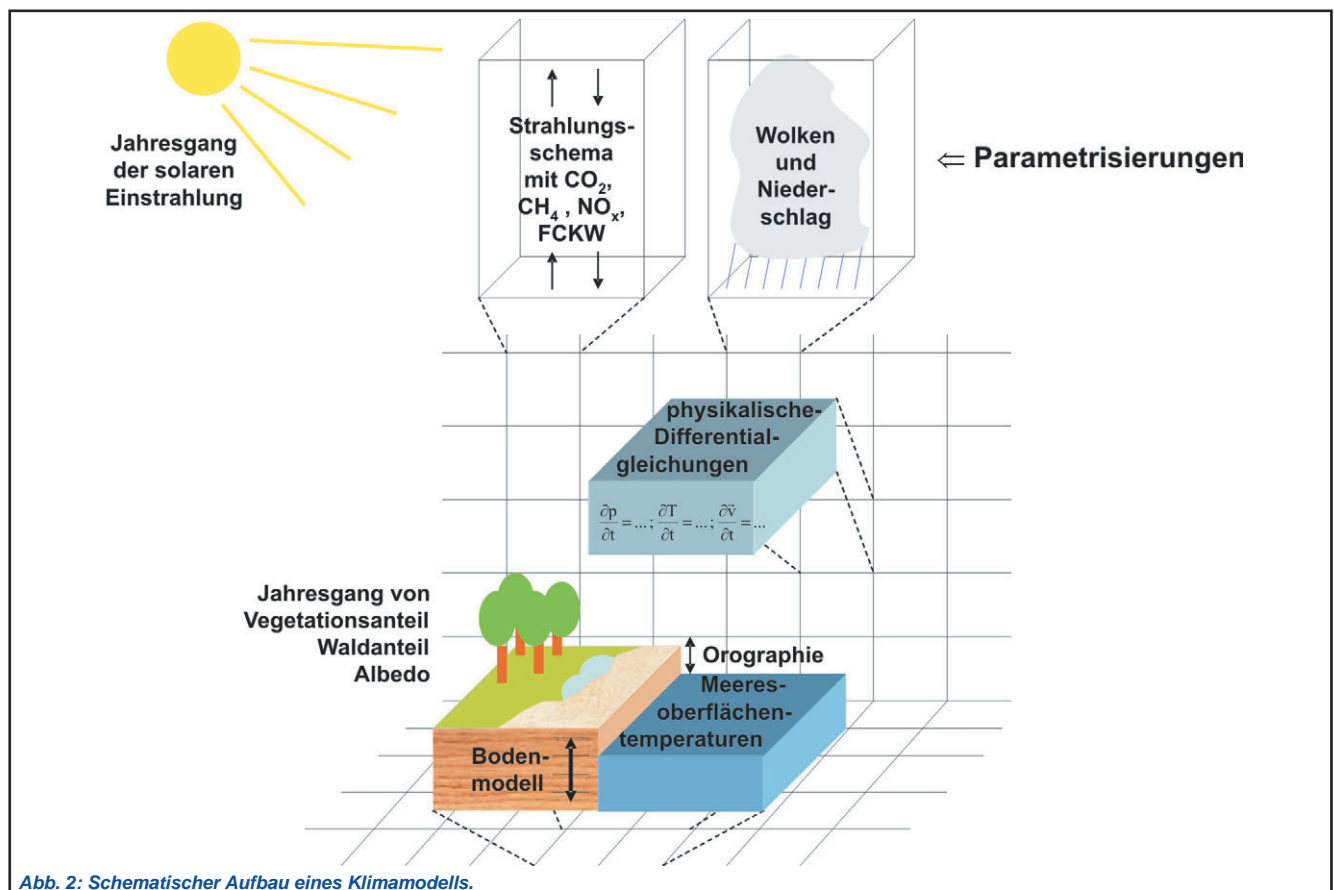


Abb. 2: Schematischer Aufbau eines Klimamodells.

sind folglich über diese Austauschvorgänge vernetzt, so dass ein komplexes interaktives Gleichungssystem für alle Raumpunkte entsteht. In der Praxis werden diese Gleichungssysteme nun räumlich und zeitlich diskretisiert, d.h. nur an Orten und Zeitpunkten mit einer bestimmten anschaulichen Distanz gelöst (von Storch *et al.*, 1999). Für die Variable E zu einem Zeitpunkt $(t+1)$ gilt beispielsweise:

$$E_{t+1} = E_t + \Delta t \cdot f(t, \vec{v})$$

Für die räumliche Diskretisierung werden Atmosphäre und Ozeane in ein dreidimensionales Gitterpunktnetz unterteilt, so dass Würfel entstehen, für die die Gleichungen einen gemeinsamen räumlich repräsentativen Wert liefern (vgl. Abbildung 2). In heutigen Klimamodellen besitzen diese Würfel typischerweise Kantenlängen von 100 bis 200 km in der Horizontalen und 100 m bis 10 km in der Vertikalen mit steigender Tendenz nach oben. Die zeitliche Diskretisierung erfolgt meist auf der Basis von drei bis fünf Minutenschritten. Es ist offensichtlich, dass durch die Diskretisierung zwischen den berechneten Zeitpunkten und Gitterpunkten Prozesse unberücksichtigt bleiben. Dies betrifft vor allem Prozesse wie die Strahlungsübertragung in der Atmosphäre, die Wolken- und Niederschlagsbildung sowie die turbulenten Austauschvorgänge an der Erdoberfläche. Diese Vorgänge laufen auf der molekularen Skala ab und können nicht durch ein Klimamodell mit einem Gitterpunktabstand von 200 km aufgelöst werden. Man spricht von nicht aufgelösten subskaligen Prozessen und von den durch die Modellgleichungen berücksichtigten skaligen Prozessen. Unter Umständen sind die subskaligen Prozesse jedoch für die Gesamtentwicklung des Klimas relevant. So kann man sich eine Gewitterzelle vorstellen, die mit einem horizontalen Durchmesser von 5 km zwar nicht auf der Skala eines Klimamodells simuliert wird, über den Niederschlagseintrag und die Rückstreuung der solaren Strahlung jedoch einen merklichen Effekt auf die mittlere Temperatur und Feuchte in einer Modellgitterbox ausübt. Deshalb werden die subskaligen Prozesse wie Strahlung, Wolkenphysik und Niederschlagsbildung durch so genannte Parametrisierungen berücksichtigt (vgl. Abbildung 2). Dabei handelt es sich um eine statistische Beschreibung des Einflusses kleinräumiger klimatischer Prozesse auf die in den Modellgleichungen auf Gitterpunktbasis berechneten Klimavariablen in Atmosphäre und Ozean. Die Parametrisierungen enthalten empirische Parameter, die beispielsweise aus einzelnen Messkampagnen gewonnen werden. Diese empirischen Parameter stellen die wichtigste Quelle der Modellunsicherheit dar, weil sie nicht zwangsläufig für alle Regionen auf der Erde und für

alle Jahreszeiten oder Witterungssituationen repräsentativ sind, aber aus Kostengründen nicht durch beliebig viele Messkampagnen abgesichert werden können. Die verschiedenen Modellierergruppen weltweit benutzen zum Teil sehr unterschiedliche Parametrisierungen, um dieser Unsicherheit Rechnung zu tragen und um keine ungerechtfertigte Modellübereinstimmung – beispielsweise bei der Simulation des zukünftigen Klimas – vorzutäuschen. Nach Berücksichtigung der Parametrisierungen P_i spricht man von geschlossenen Modellgleichungen der Form

$$E_{t+1} = E_t + \Delta t \cdot f(t, \vec{v}) + P_i$$

Diese Modellgleichungen bilden den dynamischen Kern eines Klimamodells (vgl. Abbildung 2). Sie benötigen noch einen Anfangswert E_{t_0} und schreiben dann die zeitliche Entwicklung der Variablen E von Zeitschritt t zu Schritt $t+1$ usw. fort unter Berücksichtigung der räumlichen Wechselwirkungen durch den Wind und bestimmten Randbedingungen, die etwa durch den Jahres- und Tagesgang der solaren Einstrahlung oder auch durch steigende Treibhausgaskonzentrationen gegeben sind. Weitere Charakteristika unseres Planeten fließen über die Differenzierung in Ozean- und Landgitterboxen ein. Die Landoberflächen werden weiter nach Topographie, Vegetations-, Boden- und Eisbedeckung unterschieden, um die spezifischen Strahlungs- und Turbulenzeigenschaften zum Ausdruck zu bringen.

Es resultieren sehr komplexe Gleichungssysteme, die viele empirische Vorarbeiten und Kartierungen erfordern. Insbesondere die Charakterisierung der Landoberflächen wird auf der Grundlage von Satellitendaten vorgenommen. Für die Modellierung des Klimasystems müssen die Gleichungssysteme und Randbedingungen nun einem Computer beigebracht werden. Klimamodelle sind also Computerprogramme, die zumeist auf Großrechnern durchgeführt werden. Trotz der raumzeitlichen Diskretisierung und der Parametrisierungen stellen Klimamodelle ein unverzichtbares Werkzeug der Klimaänderungsforschung dar. Denn sie erlauben die Isolierung bestimmter, zum Beispiel anthropogener Randbedingungen und den Blick in eine mögliche klimatische Zukunft. Dennoch muss den Unsicherheiten, die aus den empirischen Parametern resultieren, dadurch Rechnung getragen werden, dass nicht nur die Ergebnisse einer einzelnen Klimasimulation interpretiert werden, sondern viele Klimamodelle mit unterschiedlichen Parametrisierungen und Gitterpunktauflösungen verglichen werden.

4. Was sind Emissionsszenarien?

Eines der Haupteinsatzgebiete der Klimamodelle ist die Klimaänderungsforschung (Houghton et al., 2001). Unter der Vorgabe zukünftiger Treibhausgasemissionen wird die Entwicklung des irdischen Klimasystems bis zum Ende des 21. Jahrhunderts oder auch darüber hinaus simuliert. Dabei bleiben die natürlichen Faktoren der Klimavariabilität wie solare Schwankungen oder Vulkanausbrüche unberücksichtigt, um den Einfluss des Menschen zu separieren und die daraus resultierenden Klimaänderungen in Form von Erwärmungs- oder Dürretrends zu quantifizieren. Wegen dieser Vereinfachung spricht man nicht von Klimaprognosen, sondern von Sensitivitätsstudien. Denn Prognosen wie die Wettervorhersage sind auf eine möglichst realistische Vorhersage ausgerichtet. Bei den Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert hingegen werden bewusst bestimmte Faktoren vernachlässigt, die im realen Klimasystem auch in Zukunft aktiv sein werden. Nun besteht die Herausforderung darin, die zukünftigen Treibhausgasemissionen abzuschätzen. Dies geschieht in Form der so genannten Emissionsszenarien, bei denen bestimmte Annahmen über die zukünftige demographische, ökonomische und technologische Entwicklung der menschlichen Gesellschaft zugrunde gelegt werden (Nakicenovic et al., 2000; Houghton et al., 2001; IPCC, 2007). Ein internationales multidisziplinäres Expertenteam hat diese Annahmen gemeinsam ausgearbeitet und die resultierenden globalen Treibhausgasemissionen modelliert. Es existieren verschiedene Grundannahmen, die teils von einem stärkeren, teils von einem schwächeren politischen und gesellschaftlichen Umdenkprozess ausgehen. Dies führt zu den so genannten Szenarienfamilien A1, A2, B1 und B2, die wiederum weiter differenziert werden, so dass mittlerweile 40 verschiedene Emissionsszenarien vorliegen. Das Spektrum über diese 40 Szenarien spiegelt auch die Unsicherheit der zugrunde liegenden Annahmen wider. Die Autoren weisen dabei ganz explizit darauf hin, dass alle Szenarien die gleiche Eintrittswahrscheinlichkeit besitzen.

Die Abbildung 3 (oben) zeigt die zeitlichen Verläufe der Kohlendioxidemissionen im Zeitraum 1990 bis 2100 für verschiedene Emissionsszenarien des IPCC (Nakicenovic et al., 2000). Das Kohlendioxid ist das wichtigste anthropogene Spurengas und mit ca. zwei Dritteln an der Verstärkung des Treibhauseffektes beteiligt (Cubasch und Kasang, 2000). Es existieren auch Emissionsszenarien für die anderen klimarelevanten Spurengase wie Methan, Stickoxide und Fluorkohlenwasserstoffe. Des Weiteren zeigt die Abbildung 3 (unten) die entsprechenden Szenarien der Schwefeldioxidemissionen. Dieses Gas ist deshalb

explizit aufgeführt, weil es durch chemische Prozesse in der Atmosphäre in Sulfataerosole umgewandelt wird. Dabei handelt es sich um kleine Festkörper (Salze), die eine stärkere Absorption gegenüber kurzwelliger Einstrahlung als langwelliger Ausstrahlung besitzen und somit der Erwärmung der bodennahen Luftschichten entgegenwirken (Cubasch und Kasang, 2000). Die beobachtete Abkühlungsphase zwischen 1940 und 1970 (vgl. Abbildung 1) wird unter anderem der Wirkung der Sulfataerosole zugeschrieben, die aus unsauberen Verbrennungsvorgängen hervorgehen. Seitdem haben verbesserte Filtertechniken und Katalysatoren teilweise zu einer Verringerung der Schwefeldioxidemissionen geführt, zumindest in den Industrieländern. Es besteht auch ein Einfluss auf die

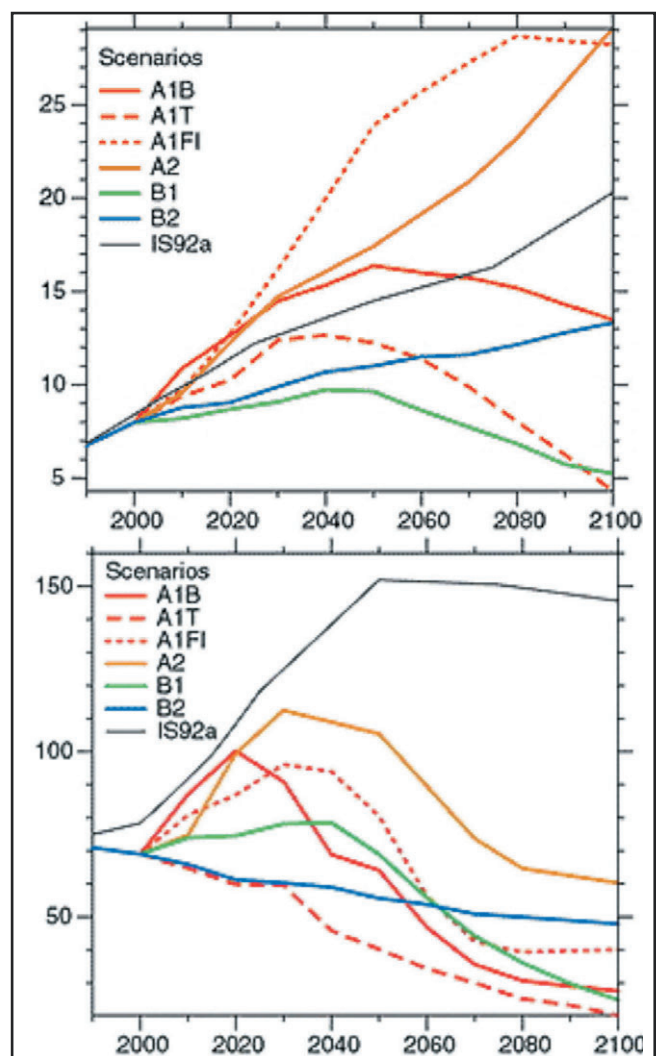


Abb. 3: Gemessene und prognostizierte atmosphärische Kohlendioxidemissionen in Gigatonnen Kohlenstoff (oben) sowie Schwefeldioxidemissionen in Teragramm Schwefel (unten) über den Zeitraum 1990 bis 2100. Die unterschiedlichen Zeitverläufe beziehen sich auf die Szenarienannahmen des IPCC (verändert nach Nakicenovic et al. 2000).

Wolkenbildung und somit auf den Niederschlag. Im Folgenden werden die Grundannahmen der Szenarien und die resultierenden Emissionen kurz beschrieben:

- Die *Szenarienfamilie A1* geht von einem sehr schnellen Wirtschaftswachstum und einer maximalen Erdbevölkerung in der Mitte des 21. Jahrhunderts aus. Neue und effizientere Technologien werden schnell eingeführt. Regionale Unterschiede auf der Erde werden durch Schulungsmaßnahmen und soziokulturelle Interaktionen verringert. Das A1-Szenario wird weiter in drei Gruppen unterschieden mit einer Energiegewinnung vorwiegend auf Basis von fossilen Energieträgern (A1FI), von regenerativen Energieträgern (A1T) sowie in einer Mischform (A1B). Bereits diese Unterscheidung führt zu völlig divergierenden zukünftigen Emissionen: So repräsentiert das A1FI-Szenario natürlich den ungünstigsten Fall mit der stärksten menschlichen Einflussnahme über weite Strecken des 21. Jahrhunderts. Die resultierenden atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen würden in diesem Fall auf fast 1000 ppm ansteigen (*Houghton et al., 2001*). Das entspricht einer Vervielfachung des vorindustriellen Wertes und wurde zuletzt am Ende des Mesozoikum, also vor rund 65 Millionen Jahren erreicht. Bei den Schwefeldioxidemissionen sieht das A1FI-Szenario einen Anstieg bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts vor mit einem darauf folgenden deutlichen Rückgang. Dieser Rückgang ist auf verbesserte Filtertechniken weltweit, also auch in den Schwellen- und Entwicklungsländern, zurückzuführen. Die beiden Szenarien A1B und vor allem A1T zeigen eine erheblich günstigere Zukunftsperspektive bezüglich beider Emissionsgase.
- Das *A2-Szenario* beschreibt eine sehr heterogene Welt mit starken Autonomiebestrebungen und lokalen Identitäten. Regional hohe Geburtenraten in den Entwicklungsländern führen zu einem kontinuierlichen Bevölkerungswachstum über das gesamte 21. Jahrhundert. Wirtschaftswachstum und technologische Entwicklung vollziehen sich nur sehr fragmentiert. Dieses Szenario führt sowohl beim Kohlendioxid als auch beim Schwefeldioxid zu einer besonders ungünstigen Entwicklung der Emissionen, die im Jahre 2100 sogar das A1FI-Szenario übertreffen.
- Die Grundannahmen des *B1-Szenarios* beinhalten die gleiche Bevölkerungsentwicklung wie im A1-Szenario, aber gehen von einer starken Veränderung der Wirtschaftsstruktur zugunsten einer Dienstleistungsgesellschaft aus, die weniger

materielle Ressourcen verbraucht und auf sauberere Technologien zurückgreifen kann. Dabei wird zunehmend auf globale Lösungsstrategien im Sinne einer sozialen, ökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeit gesetzt. Das B1-Szenario entspricht einer besonders günstigen Zukunftsperspektive mit den geringsten Kohlendioxidemissionen und einem deutlichen Rückgang der Schwefeldioxidemissionen bis zum Jahre 2100.

- Die *Szenarienfamilie B2* ist schließlich eine Mischform aus den Szenarien B1 und A2: Es werden Strategien der Nachhaltigkeit implementiert, aber nicht im globalen, sondern nur im regionalen Kontext. Die Erdbevölkerung steigt bis zum Jahre 2100 kontinuierlich an, aber auf einem etwas geringeren Niveau als im A2-Szenario. Es wird ein mittleres Wirtschaftswachstum unterstellt mit etwas langsameren technologischen Weiterentwicklungen als in B1 und nur auf regionaler Ebene. Umweltschutz und soziale Angleichung spielen in vielen Regionen, aber nicht überall eine wichtige Rolle in der Politik. Dieses Szenario impliziert Treibhausgas- und Schwefeldioxidemissionen im mittleren Bereich des Spektrums.
- Zuletzt enthält die Abbildung 3 noch das *Szenario IS92a*. Dabei handelt es sich um ein älteres Szenario, auf dem die Klimamodellsimulationen des 1. und 2. Sachstandsberichtes des IPCC basieren (vgl. *Houghton et al., 2001*). Hinsichtlich der Kohlendioxidemissionen ordnet es sich im oberen Bereich an zwischen A1B und A1FI. Bezüglich der Schwefeldioxidemissionen liegt hingegen die Annahme zugrunde, dass in den Entwicklungs- und Schwellenländern auch in Zukunft kaum Filtertechniken zum Einsatz kommen. Dadurch steigen die Emissionen bis 2050 weiter an und verharren dann auf einem sehr hohen Niveau. Diese Annahme ist aufgrund der rezenten Entwicklung nicht mehr tragbar, so dass das IS92a-Szenario heute keine Anwendung mehr findet. Es ist hier nur zum Vergleich aufgeführt.

Bei der Verwendung der Emissionsszenarien hat zuletzt ein Paradigmenwechsel stattgefunden. Während die Klimamodellsimulationen im Rahmen des 3. Sachstandsberichtes die Szenarien A2 und B2 berücksichtigt haben (*Houghton et al., 2001*), beruht der aktuelle Sachstandsbericht auf den Szenarien A1B, B1 und A2 (IPCC 2007). Im Folgenden sollen nun einige Klimamodellergebnisse aus dem 4. Sachstandsbericht vorgestellt werden, die aus den oben genannten Szenarienannahmen hervorgegangen sind. Dabei wird noch einmal darauf hingewiesen, dass das Emissionsszenario jeweils eine Randbedingung

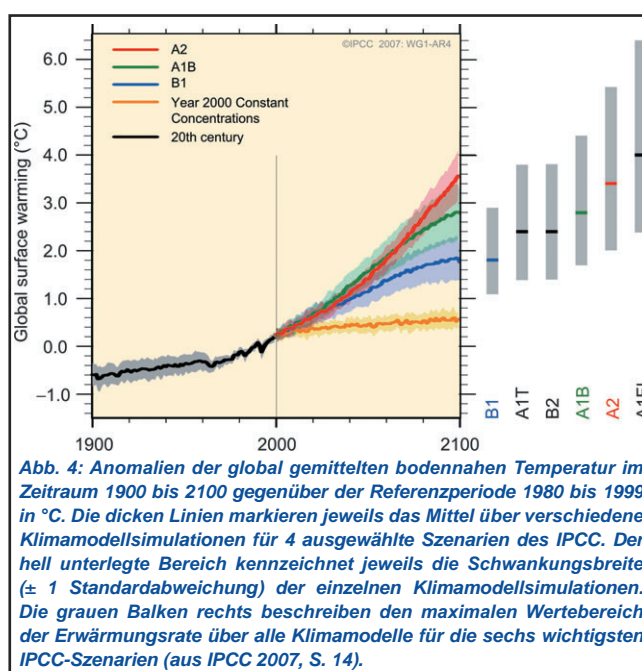
in den Modellgleichungen repräsentiert, also a-priori vorgegeben wird, wohingegen die simulierten Klimaänderungen das berechnete Ergebnis der komplexen nichtlinearen Modellgleichungen darstellen.

5. Was zeigen Klimamodelle für das 21. Jahrhundert?

Gemäß unserem physikalischen Verständnis des Strahlungshaushaltes und Treibhauseffektes sollte sich eine Erhöhung der Treibhausgaskonzentrationen unmittelbar in einer Erwärmung der bodennahen Luftschichten niederschlagen (Cubasch und Kasang, 2000). Deshalb wird häufig die global gemittelte bodennahe Lufttemperatur als primärer Indikator für den anthropogenen Klimawandel betrachtet. Die Abbildung 4 illustriert die zeitliche Entwicklung der simulierten globalen Mitteltemperatur in Vergangenheit und Zukunft als Anomalien gegenüber der Referenzperiode 1980 bis 1999. Die farbigen Linien repräsentieren die Mittelwerte über verschiedene Klimamodellsimulationen unter der Vorgabe der oben beschriebenen IPCC-Szenarien. Die schattierten Bereiche kennzeichnen die zugehörige Unsicherheit, die aus den individuellen Modellparametrisierungen und Anfangswerten für t_0 hervorgeht, und zwar in Form der einfachen Standardabweichung (von Storch und Zwiers, 1999). Innerhalb dieser Bereiche befinden sich etwa 68 % aller simulierten Temperaturwerte zu jedem Zeitpunkt. Die grauen Balken auf der rechten Seite der Abbildung 4 markieren hingegen den gesamten Wertebereich der Temperaturveränderung, der durch die Klimamodellsimulationen innerhalb einer Szenarienfamilie bzw. -gruppe im Jahre 2100 aufgespannt wird.

Es ist offensichtlich, dass alle Klimamodellsimulationen unabhängig vom vorgegebenen Emissionsszenario eine Temperaturerhöhung über die kommenden Jahrzehnte in Aussicht stellen. Dies gilt in Analogie zu den Beobachtungsdaten (vgl. Abbildung 1) auch für den Zeitraum des 20. Jahrhunderts, obwohl sich die Erwärmungsrate in Zukunft noch zu beschleunigen scheint. Die Amplitude der Erwärmung bis zum Jahre 2100 ist natürlich abhängig vom Emissionsszenario: Das ungünstigere A2-Szenario gipfelt in einer mittleren Temperaturerhöhung um 3,6°C, wohingegen das B1-Szenario 1,8°C berechnet. Selbst im Falle eines sofortigen Emissionsstopps auf dem Niveau von 2000 würde die Temperatur um weitere 0,6°C gegenüber dem Ende des 20. Jahrhunderts ansteigen. Die Unsicherheitsbereiche sind jedoch beträchtlich. Die grauen Balken beginnen bei einer minimalen Erwärmung um 1,1°C bis 2100 im Falle

des B1-Szenarios und einer maximalen Erwärmung um 6,4°C im Falle des A1FI-Szenarios. Die Frage, welches Szenario bzw. welche Klimamodellsimulation nun die höchste Wahrscheinlichkeit besitzt, lässt sich a-priori leider nicht beantworten. Geht man vom Mittel über alle Simulationen und Szenarien aus, ist mit einem Temperaturanstieg um ca. 2,8°C bis zum Ende des 21. Jahrhunderts zu rechnen. Eine solche Temperaturänderung würde wohl teils gravierende Konsequenzen für unsere Lebensbedingungen haben, sowohl in ökologischer als auch in sozioökonomischer Hinsicht (s. nachfolgende Kapitel sowie von Storch et al., 1999).



Durch die Veränderung der Temperatur werden schließlich auch andere Klimavariablen wie Wind, Bodendruck und Niederschlag modifiziert. Dies liegt daran, dass die Gradienten der Temperatur ein Auslöser für die atmosphärische und ozeanische Zirkulation sind, die wiederum zur Bildung von Niederschlagssystemen führt. Die Absolutwerte der Temperatur sind ferner ausschlaggebend für die Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Luft. Die Abbildung 5 zeigt die globalen Muster der mittleren Temperatur-, Niederschlags- und Bodendruckänderungen im Nordwinter und Nordsommer über das 21. Jahrhundert unter Annahme des A1B-Szenarios. Es fällt sofort auf, dass die simulierten Klimaänderungen regional sehr unterschiedlich ausfallen. Dies gilt auch für die Temperatur, obwohl sich der Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen räumlich sehr homogen vollzieht. Die stärkste Erwärmungsrate

wird nach Aussage der Klimamodelle im Nordwinter in der Nordpolarregion von statten gehen mit Werten über $7,5^{\circ}\text{C}$. Diese exorbitante Erwärmung lässt sich dadurch erklären, dass die Meereis- und Schneebedeckung stark zurückgeht und somit mehr Sonnenstrahlung an der Erdoberfläche in Wärme umgesetzt werden kann (Cubasch und Kasang, 2000; Paeth, 2006). Ein deutlich geringerer Temperaturanstieg wird wohl über den Ozeanregionen der mittleren Breiten zu verzeichnen sein mit Werten um $0,5^{\circ}\text{C}$ bis $1,5^{\circ}\text{C}$. In diesen Gebieten wird der höhere Energieeintrag durch die Treibhausgase vermutlich durch eine verstärkte Zyklonenaktivität und Advektionsprozesse aus den höheren Breiten annähernd kompensiert. Im Nordsommer ergibt sich ein ähnliches Bild, wobei der starke Temperaturanstieg über den nördlichen Breiten nicht zum Ausdruck kommt, weil der Schnee- und Meereiseffekt im Sommer der Nordhemisphäre viel schwächer ist.

Während die Klimaänderung hinsichtlich der Temperatur überall das gleiche Vorzeichen besitzt, ergibt sich beim Niederschlag ein stark differenziertes Bild. Eine Zunahme der sommerlichen und winterlichen Niederschläge findet in den Klimamodellen in den mittleren und hohen Breiten beider Halbkugeln sowie vor allem in den inneren Tropen statt. Demgegenüber könnten die subtropischen Bereiche durch trockenere Klimabedingungen gekennzeichnet sein. Das ist insofern besorgniserregend, als in diesen Regionen ohnehin schon die Trockengebiete der Erde liegen. Ein

weiterer Niederschlagsrückgang würde die Lebensbedingungen hier besonders stark erschweren. Dazu gehören auch die Mittelmeerregion und der altweltliche Trockengebietsgürtel (Sahara, Vorderer Orient, Zentralasien) sowie dicht besiedelte Gebiete in Mittelamerika, Süd- und Nordafrika. Die erhöhten Niederschläge in den Tropen und mittleren Breiten sind auf den höheren Wasserdampfgehalt in der wärmeren Luft zurückzuführen. Der Niederschlagsrückgang in den Subtropen wird vermutlich durch eine Verstärkung der tropischen Zirkulationszelle verursacht.

Beim Bodendruck zeichnet sich allgemein eine Erhöhung über den Ozeanregionen der mittleren Breiten ab, während eine Abnahme über den Polregionen simuliert wird. Dadurch verstärkt sich vor allem im Nordwinter der meridionale Druckgradient, der für die Intensität der Westwinde und die Entstehung von Tiefdruckgebieten verantwortlich ist. Die Folge könnte eine Zunahme von Orkanen und Sturmtiefs in den mittleren Breiten sein (Houghton et al., 2001; IPCC, 2007). Ferner wird im Nordwinter über dem Mittelmeergebiet eine ostwärtige Ausdehnung des Azorenhochs sichtbar, das als ein Hemmfaktor für die winterlichen Störungen vom Nordatlantik wirken und die Niederschlagsabnahme im Winterregengebiet des Mittelmeeres erklären könnte. Ein Aspekt des Klimawandels, der aus sozioökonomischer Sicht besonders gefürchtet wird, betrifft die meteorologischen Extremereignisse. Dabei handelt es sich beim Wetter um Stürme, Starkniederschlagser-

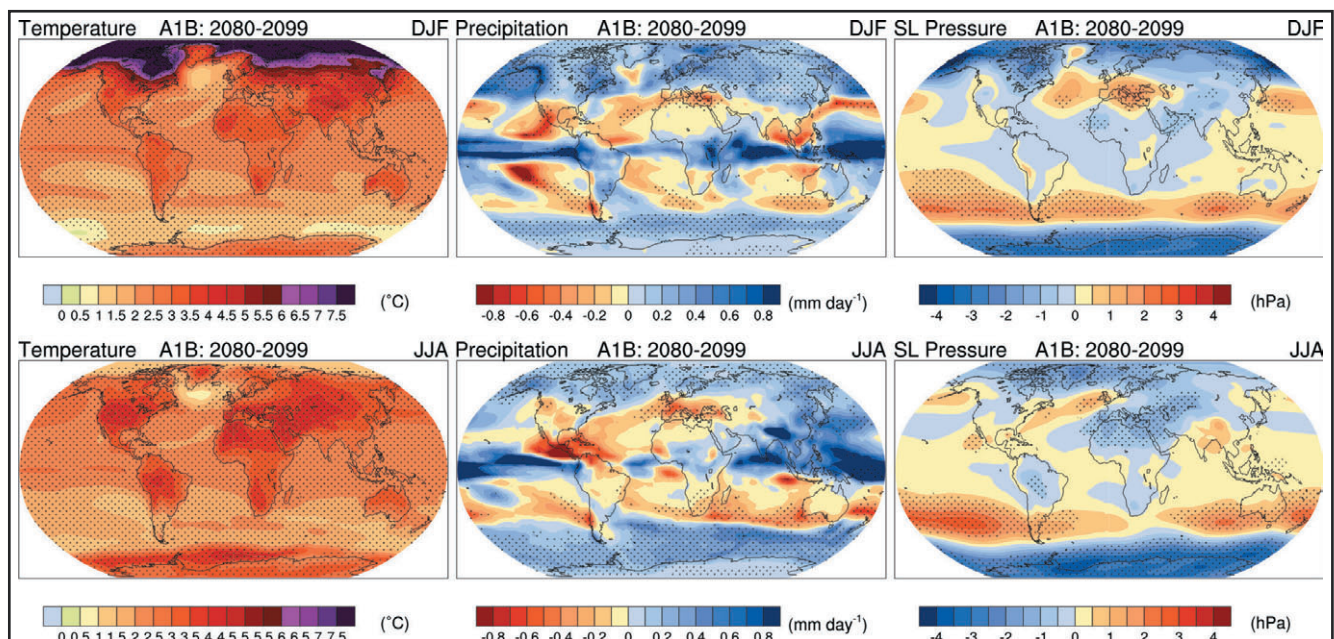
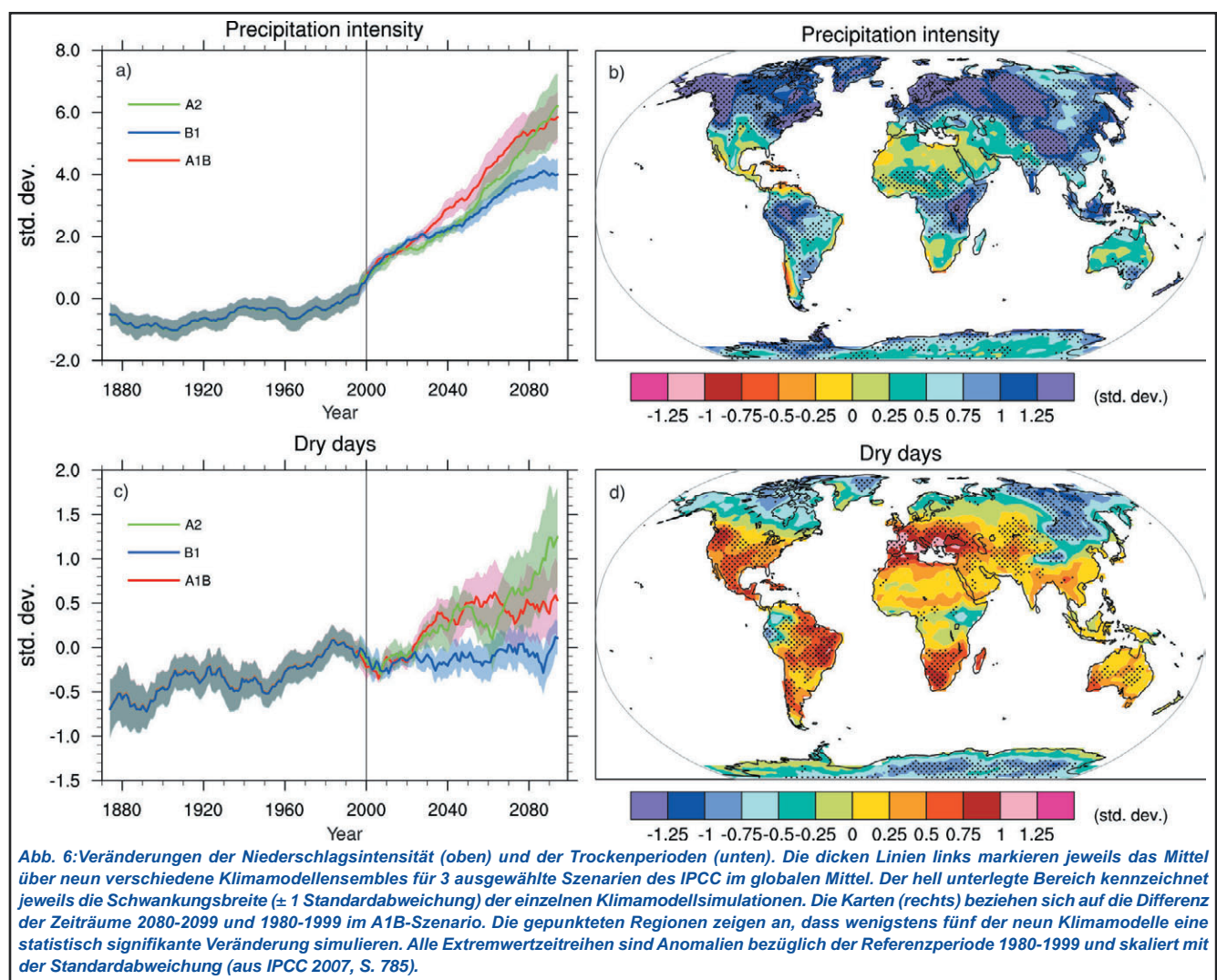


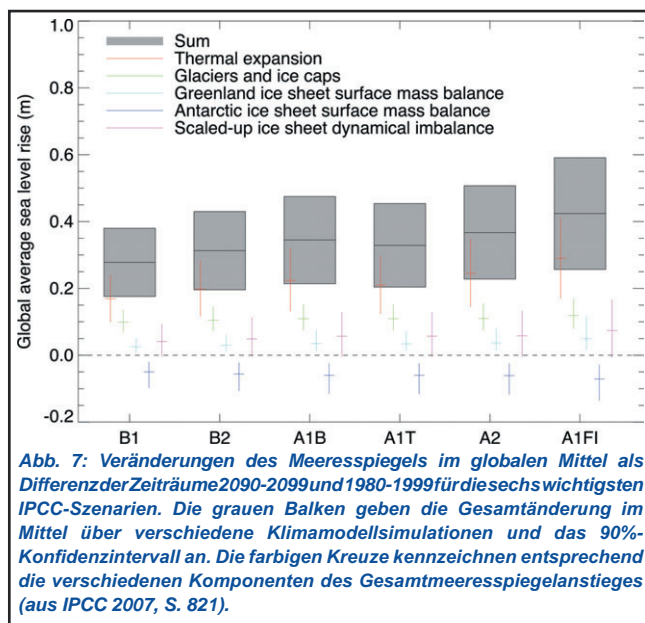
Abb. 5: Veränderungen der bodennahen Temperatur in $^{\circ}\text{C}$ (links), des Niederschlags in mm pro Tag (Mitte) und des reduzierten Bodendrucks in hPa (rechts) als Differenz der Zeiträume 2080-2099 und 1980-1999 im Mittel über verschiedene Klimamodellsimulationen der A1B-Gruppe. Die obere Reihe bezieht sich auf den Nordwinter (Dezember-Februar), die untere Reihe auf den Nordsommer (Juni-August). In den gepunkteten Regionen übertrifft die mittlere Änderungsrate die Standardabweichung zwischen den verschiedenen Klimamodellsimulationen (aus IPCC 2007, S. 767).

eignisse und Hitzetage sowie beim Witterungsablauf um Dürre- bzw. Trockenperioden, Hitzewellen und Überschwemmungen. Sowohl die Simulation als auch die messtechnische Erfassung von Extremereignissen ist eine große Herausforderung, so dass Aussagen über veränderte Häufigkeiten oder Intensitäten von Extremereignissen immer mit einer großen Unsicherheit verbunden sind. Die Abbildung 6 zeigt die von verschiedenen Klimamodellen projizierten Veränderungen der Niederschlagsintensität und der Trockenperioden bis zum Jahre 2100. Im globalen Mittel zeichnet sich in allen Emissionsszenarien und Klimasimulationen eine deutliche Erhöhung der Niederschlagsintensität ab, die teilweise über vier Standardabweichungen vom langjährigen Mittel abweicht. Eine solche Anomalie ist im Rahmen der natürlichen Klimavariabilität äußerst selten (weniger als einmal in 1000 Jahren) und spricht somit für den Einfluss des Menschen.

Die Erhöhung der Niederschlagsintensität gilt für die meisten Landregionen der Erde außer in vereinzelten Gebieten Nordafrikas, Mittel- und Südamerikas (vgl. Abbildung 6, rechts oben) und somit auch dort, wo die Gesamtniederschlagssumme abnimmt, wie beispielsweise im Mittelmeerraum (vgl. Abbildung 5, Mitte). Es zeichnet sich beim Niederschlag folglich eine sehr komplexe Reaktion auf die steigenden Treibhausgaskonzentrationen ab: Die Verteilung der Niederschlagsereignisse verschiebt sich in vielen Regionen der Erde hin zu Starkniederschlägen mit entsprechendem Überflutungspotenzial, obwohl in manchen dieser Regionen das Gesamtwasserdargebot zurückgeht.

Die Trockenperioden in Abbildung 6 (unten) sind definiert als der längste Zeitraum im Jahr, in dem kein Niederschlag fällt. Solche Trockenphasen stellen einen limitierenden Faktor für die Landwirtschaft dar. Obwohl die Veränderungen hier nicht so stark ausge-





prägt sind wie bei der Niederschlagsintensität, stimmen A1B- und A2-Szenario darin überein, dass sich die Trockenphasen über den meisten Landregionen deutlich verlängern. Besonders dramatisch könnte sich dieser Wandel in den dicht besiedelten und landwirtschaftlich intensiv genutzten Regionen Mittel- und Südamerikas, Südafrikas und Südeuropas bemerkbar machen. Die Ausnahme bilden die Polarregionen auf beiden Hemisphären. Ein typischer Witterungsablauf gegen Ende des 21. Jahrhunderts könnte folglich durch längere Trockenperioden gekennzeichnet sein, die durch intensive und kurze Starkniederschlagsereignisse unterbrochen werden. Eine solche Entwicklung hätte sowohl für die Landwirtschaft als auch für die Versicherungsbranche negative Folgen.

Eine weitere viel beachtete Konsequenz des mutmaßlichen anthropogenen Klimawandels ist der Meeresspiegelanstieg, der für Küstenländer mit hoher Bevölkerungsdichte ein zentrales Problem darstellt. Die Befürchtung ist, dass das Schmelzen der Inlandeismassen den beobachteten Meeresspiegelanstieg von ca. 8 cm seit Beginn der Industrialisierung in Zukunft beschleunigen könnte. Die simulierten Veränderungen des Meeresspiegels bis zum Ende des 21. Jahrhunderts sind in Abbildung 7 aufgeführt. Die Balken geben für jedes Szenario die mittleren Änderungsraten und die über verschiedene Klimamodellsimulationen ermittelten Unsicherheitsbereiche an. Die Kreuze geben Aufschluss über die beteiligten Prozesse. Es fällt auf, dass alle Emissionsszenarien zu relativ ähnlichen Einschätzungen über den zukünftigen Meeresspiegelanstieg führen. Die Unsicherheitsbereiche sind jeweils stärker

ausgeprägt, als die mittleren Unterschiede zwischen den Szenarien. Im günstigsten Fall (B1) wird ein Anstieg um knapp 20 cm simuliert, im ungünstigsten Fall (A1FI) um knapp 60 cm. Diese Werte liegen weit unter den Abschätzungen der frühen 1990er Jahre, als noch von mehreren Dekametern Meeresspiegelanstieg ausgegangen wurde (*Houghton et al., 2001*). Der Grund für diese Diskrepanz liegt darin, dass aktuelle Klimamodelle eher eine positive Massenbilanz in der Antarktis simulieren. Diese kommt dadurch zustande, dass der erhöhte Schneeeintrag über der Antarktis (vgl. Abbildung 5) den Eisverlust durch Kalben an den Rändern überkompensiert. So offenbart auch die Abbildung 7 einen negativen Beitrag der Antarktis zum Gesamtmeeresspiegelanstieg. Letzterer ist in erster Linie auf die thermische Expansion des Ozeans zurückzuführen. Denn wärmeres Meerwasser dehnt sich aus. Zusätzliche verstärkende Komponenten sind die Abschmelzvorgänge in den Hochgebirgsgletschern, der Schmelzwassereintrag vom Grönländischen Eisschild sowie die Beschleunigung des Eisflusses innerhalb der großen Eisschilde.

6. Das Nachweisproblem

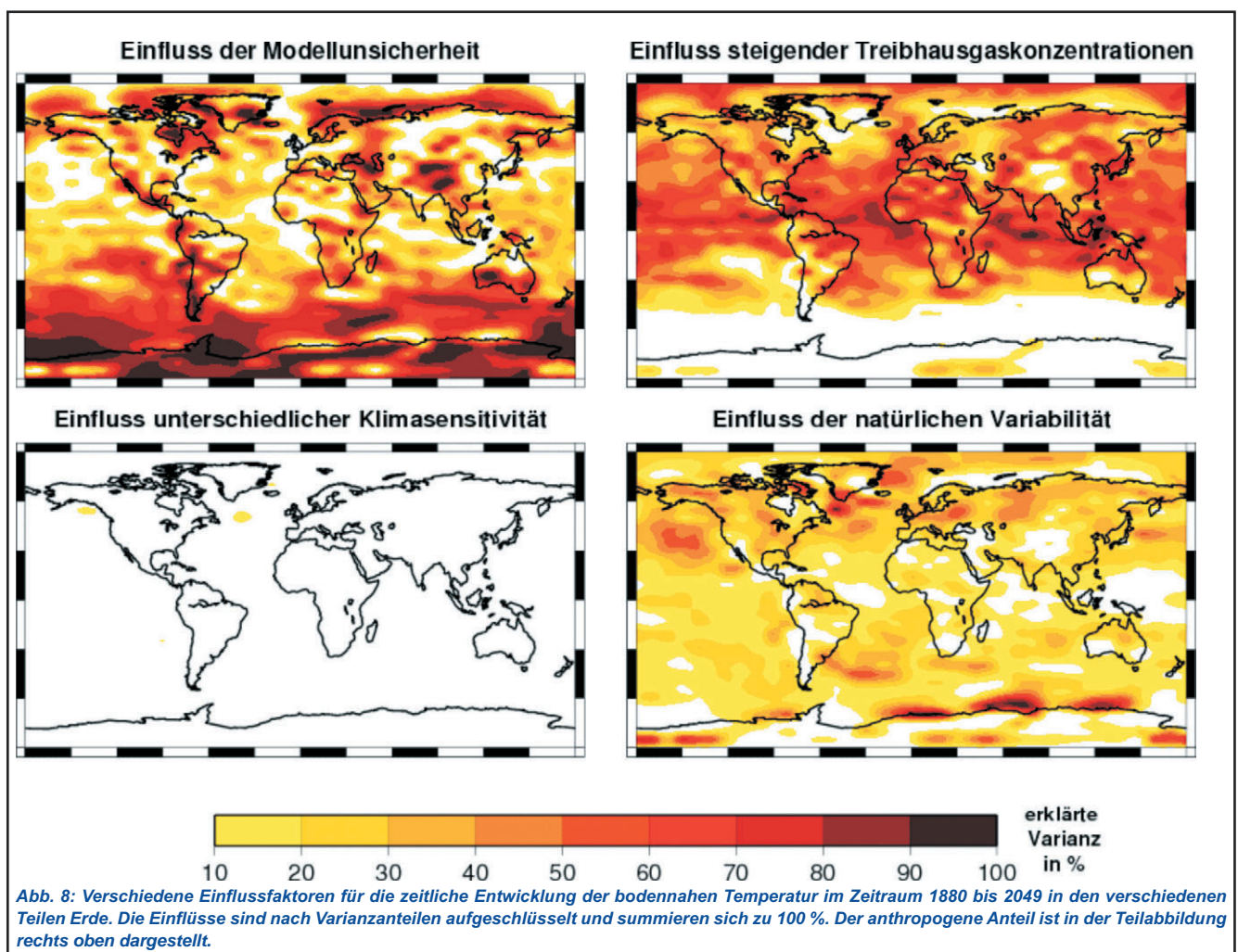
Die bisher vorgestellten Befunde der Klimamodellierung im Rahmen des 4. Sachstandsberichtes des IPCC scheinen eine deutliche Sprache zu sprechen: Die meisten Regionen der Erde könnten im Verlaufe des 21. Jahrhunderts deutliche Veränderungen im bodennahen Klima, aber auch in höheren Atmosphärenschichten erfahren (*Houghton et al., 2001; IPCC, 2007*). Diese äußern sich primär in einem Temperaturanstieg und sekundär in einer Veränderung der Zirkulationsmuster und des hydrologischen Kreislaufs verbunden mit einer Häufung von meteorologischen Extremereignissen. Einige dieser Tendenzen zeichnen sich bereits seit Mitte des 20. Jahrhunderts in den Beobachtungsdaten ab. Somit scheint im Indizienprozess gegen den "Klimasünder Mensch" alles für eine anthropogene Klimabeeinflussung zu sprechen.

Auf der anderen Seite weiß man aber auch um die ausgeprägten Klimaschwankungen in der Vergangenheit, die durch die natürlichen Faktoren der Klimavariabilität hervorgerufen wurden. Darüber hinaus offenbaren die hier gezeigten Abbildungen einige nicht zu vernachlässigende Diskrepanzen zwischen verschiedenen Klimamodellsimulationen. Auch die Erarbeitung der Emissionsszenarien beinhaltet zahlreiche Unwägbarkeiten hinsichtlich der demographischen, ökonomischen und technologischen Entwicklung unserer Gesellschaft. Selbst hinsichtlich der globalen Mitteltemperatur variiert das

Spektrum möglicher Erwärmungsraten zwischen 1,1°C und 6,4°C (vgl. Abbildung 4). Im regionalen Kontext ist dieser Wertebereich meist noch weiter gefasst. Beim Niederschlagstrend unterscheiden sich einige Klimamodellsimulationen sogar im Vorzeichen. Wie lässt sich nun beurteilen, ob sich die oben beschriebenen Klimaänderungen tatsächlich von der natürlichen Variabilität und der Modellunsicherheit absetzen? Diese Frage ist offensichtlich ganz entscheidend in der Diskussion um finanziell aufwendige Klimaschutzmaßnahmen und Anpassungsstrategien. Hier helfen nun statistische Verfahren aus. Eine Möglichkeit, die gemeinsamen Klimaänderungssignale verschiedener Klimamodellsimulationen vor dem Hintergrund der Modellunsicherheit und natürlichen Variabilität zu evaluieren, ist die so genannte doppelte Varianzanalyse (von Storch und Zwiers, 1999; Paeth und Hense, 2002; Paeth, 2006). Hierbei wird die Gesamtvariabilität eines Datenkollektivs aus mehreren Klimamodellsimulationen in vier Varianzanteile differenziert: der Einfluss steigender Treibhausgaskonzen-

trationen, der in allen Klimamodellsimulationen zum Ausdruck kommt und somit einen relativ klaren Hinweis auf den anthropogenen Klimawandel liefert, die Modellunsicherheit, die natürliche Variabilität und ein Anteil, der aus der unterschiedlichen Sensitivität der Klimamodelle gegenüber den vorgeschriebenen Emissionsszenarien hervorgeht. Die Varianzanalyse lässt sich für beliebige Klimavariablen und Regionen anwenden, so dass auch ein räumlich differenziertes Bild des Einflusses der Treibhausgaskonzentrationen generiert werden kann. Die Abbildung 8 zeigt das Ergebnis einer doppelten Varianzanalyse auf Grundlage der simulierten bodennahen Temperatur aus mehreren europäischen Klimamodellsimulationen für den Zeitraum 1880 bis 2049. Die vier Varianzanteile sind in % angegeben und summieren sich an jedem Modellgitterpunkt exakt auf 100 %.

Es fällt zunächst auf, dass sich die Klimamodelle hinsichtlich ihrer Klimasensitivität nur unmerklich voneinander unterscheiden (vgl. Abbildung 8, links unten). Der anthropogene Klimawandel kommt in der



Teilabbildung rechts oben zum Ausdruck. Er dominiert die Temperaturentwicklung in den Klimamodellen vor allem über den Ozeanregionen der niederen Breiten mit Varianzanteilen bis zu 90 %. Die gesamten Subtropen und Teile der mittleren Breiten sind durch einen relativ hohen Einfluss steigender Treibhausgaskonzentrationen gekennzeichnet. Sehr viel geringer sind die Varianzanteile hingegen in den südlichen Breiten, in den Hochgebirgsregionen, entlang der Meereisränder und in den Entstehungsbereichen der außertropischen Tiefdruckgebiete, also im Nordatlantik, Nordpazifik und im südlichen Ozean. Die letztgenannten Regionen unterliegen einem starken Einfluss der natürlichen Variabilität (vgl. Abbildung 8, rechts unten). Tatsächlich zeichnen sich diese Gebiete auch in Abbildung 5 durch die geringsten Erwärmungsraten bis zum Ende des 21. Jahrhunderts aus. Die übrigen Regionen mit einem untergeordneten Einfluss der steigenden Treibhausgaskonzentrationen sind von der Modellunsicherheit geprägt (vgl. Abbildung 8, links oben). Verschiedene Klimamodellsimulationen für das 21. Jahrhundert divergieren vor allem über den Hochgebirgen, entlang der Meereisränder sowie im Bereich des grönländischen und antarktischen Eisschildes.

Somit können nicht alle Regionen der Erde gleichermaßen als Indikator für den anthropogenen Klimawandel dienen. Ein deutliches Klimaänderungssignal liegt in den niederen Breiten vor, wo die Erwärmungsrate allerdings im globalen Vergleich eher gering ausfällt (vgl. Abbildung 5). Der starke Temperaturanstieg in den Polarregionen und Hochgebirgen ist hingegen durch eine besonders hohe Modellunsicherheit gekennzeichnet. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass der Nachweis des anthropogenen Klimawandels stets vor dem Hintergrund der natürlichen Variabilität und Modellunsicherheit erfolgen muss. Auch in den aktuellen Klimamodellsimulationen für das 21. Jahrhundert besteht in vielen Regionen der Erde noch Ungewissheit über den konkreten Einfluss eines anthropogen verstärkten Treibhauseffektes (IPCC, 2007).

7. Fazit

Die Zielsetzung des vorliegenden Beitrages bestand darin, den Leser mit der Notwendigkeit, der Funktionsweise, den Schwierigkeiten und den aktuellen Ergebnissen der Klimamodellierung vertraut zu machen. Nach wie vor können viele Prozesse des realen Klimasystems in den Klimamodellen nur durch Parametrisierungen erfasst werden, die gewissen Unsicherheiten unterliegen und zu teils erheblichen Diskrepanzen zwischen unterschiedlichen Klimamodellsimulationen führen. Dies ist zum einen

bedingt durch unser unvollkommenes Verständnis des irdischen Klimasystems, zum anderen durch begrenzte Computerressourcen. Auf der anderen Seite sind Klimamodelle in der Diskussion um den anthropogenen Klimawandel unverzichtbar. Denn sie ermöglichen die Isolation bestimmter Einflussfaktoren und erlauben den Blick in eine mögliche klimatische Zukunft unter der Vorgabe bestimmter Emissionsszenarien. In der Klimaänderungsforschung lassen sich durch die Kombination von Klimamodellierung und statistischer Analyse wichtige Erkenntnisse über den relativen Einfluss steigender Treibhausgaskonzentrationen in den verschiedenen Teilen der Erde gewinnen. Somit können die so genannten *Hot Spots* der durch die Klimamodellsimulierten mutmaßlichen Klimaänderung identifiziert und zielgerichtet präventive Maßnahmen im regionalen Kontext erarbeitet werden.

Literatur

- Cubasch, U., Kasang, D. (2000): Anthropogener Klimawandel. Klett-Perthes, Gotha, 124 pp.
- Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., Van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (2001): Climate Change 2001. The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge, 944 pp.
- IPCC (2007): Working Group 1: The Physical Basis of Climate Change. <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>.
- Mann, M.E., Bradley, R.S., Hughes, M.K. (1998): Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, 392, 779-787.
- Nakicenovic, N. and 27 co-authors (2000): Special Report on Emission Scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge 570 pp.
- Paeth, H. (2006): Klimavorhersagen mit Computernmodellen. *Geographie heute*, 241/242, 60-64.
- Paeth, H., Hense, A. (2002): Sensitivity of climate change signals deduced from multi-model Monte Carlo experiments. *Climate Research*, 22, 189-204.
- Schönwiese, C.-D. (1995): Klimaänderungen. Springer-Verlag, Berlin, 224 pp.
- Stott, P.A., Tett, S.F.B., Jones, G.S., Allen, M.R., Mitchell, J.F.B., Jenkins, G.J. (2000): External control of 20th century temperature by natural and anthropogenic forcings. *Science*, 290, 2133-2137.
- Von Storch, H., Güss, S., Heimann, M. (1999): Das Klimasystem und seine Modellierung. Springer-Verlag, Berlin, 255 pp.
- Von Storch, H., Zwiers, F.W. (1999): Statistical analysis in climate research. Cambridge University Press, Cambridge, 484 pp.